

基于国际经验的上海重型货车运输减碳策略研究

田田甜 金昱 宋少飞

【摘要】重型货车是交通运输行业碳排放最为集聚的领域之一，加强重型货车减碳策略研究，对于交通运输低碳发展具有重要意义。本文首先分析了国际城市货运减碳经验，可为我国货运减碳策略制定提供参考借鉴。而后利用上海重型货车 GPS 数据，计算得出市域重型货车碳排放量及其空间分布，并探讨了重型货车碳排放与产业布局间的相互关系。最后结合国际经验与重型货车碳排放特征分析，从空间、交通和碳排放协同角度提出上海重型货车减碳策略与建议，具体包含优化产业空间布局、优化货运交通结构、优化交通路权分配、优化能源利用结构等方面。研究成果可为上海减碳规划提供决策支撑，并进一步提高上海货运减碳效率。

【关键词】重型货车；减碳策略；国际经验；碳排放特征

0 引言

交通运输是全球碳排放的重点行业，也是增长最快的行业之一，其中重型货车是行业中碳排放最为集聚的领域之一。2021 年全球交通运输行业碳排放约 0.93 亿吨，占全球碳排放约 25.4%，其中重型货车碳排放约 0.18 亿吨，占比达 5.1%^[1]。2020 年我国重型货车（指载重量 12t 以上的货车）保有量仅占我国民用汽车总量的 3.1%，但贡献了道路交通碳排放的约 50%以上，占交通运输行业碳排放的比例也达到 40%以上^[2]。由于具备“门到门”运输和便捷等特性，在未来一段时间公路运输仍将作为主要的货运方式。因此，在“双碳”发展目标背景下，加强重型货车减碳策略研究，对于交通运输行业低碳发展具有重要意义。

国内外学者对于提高货车能源效率、发展清洁能源方面进行了大量研究^[3,4]，然而侧重于重型货车运输需求和运输活动方面的研究较少。考虑到重型货车碳排放与城市产业空间布局、港口布局及集疏运系统等因素息息相关，亟需从空间、交通和碳排放协同角度提出更具针对性的减碳策略。此外，国际城市针对货运减碳也开展了诸多实践，通过借鉴国际经验可为我国重型货车减碳策略研究提供更多元化的思路与方法。本文以上海为例，结合国际城市实践经验与上海碳排放特征分析，提出针对上海的重型货车减碳策略与建议，以进一步提高上海市货运减碳效率。

1 国际城市货运减碳经验

德国政府于 20 世纪 90 年代提出“避免—转移—提升”（Avoid-Shift-Improve, 简称 A-S-I）策略，旨在推动绿色出行方式的使用与可持续交通系统的建设，以实现降低交通空气污染物和温室气体排放，缓解交通拥堵的目标^[5]。参考 A-S-I 思路，国际城市货运减碳策略可被分为三类：①避免（Avoid）：通过合理的产业空间规划与物流中心布局等减少非必要重型货车

需求以及远程运输需求；②转移（Shift）：通过加强内河航运与铁路货运网络等基础设施建设与改善，提高水铁运输效率与吞吐量，推动道路货运向水运和铁路等低碳方式转变；③提升（Improve）：一方面提升汽车能效，推广新能源货车和其他新技术，减少对于传统燃油的依赖；另一方面通过提高货车运行精细化治理能力，如设置货车专用通道等减少道路货车尾气排放。以下分别对各策略的城市实践案例开展介绍。

1.1 优化产业与物流系统布局

日本横滨和丹麦哥本哈根均通过优化物流配送系统以提升货运效率，降低货运碳排放。2004 年，日本横滨元町购物街开启了商圈公共配送中心模式^[6]，其建立了占地约 330m² 的共同配送中心，在一个中立的承运人组织下，由三辆低排放的天然气动力货车（CNG）实现配送中心与商业街区之间的货物运输（图 1）。政策实施后，承运人数从 17 变成了 1，车辆类型从柴油车变为了天然气动力车，配送次数也从每月 40 次下降到 20 次，这一系列措施都为该地区提供了一种环保的配送方式，也给商区周围的居民生活带来了改善。

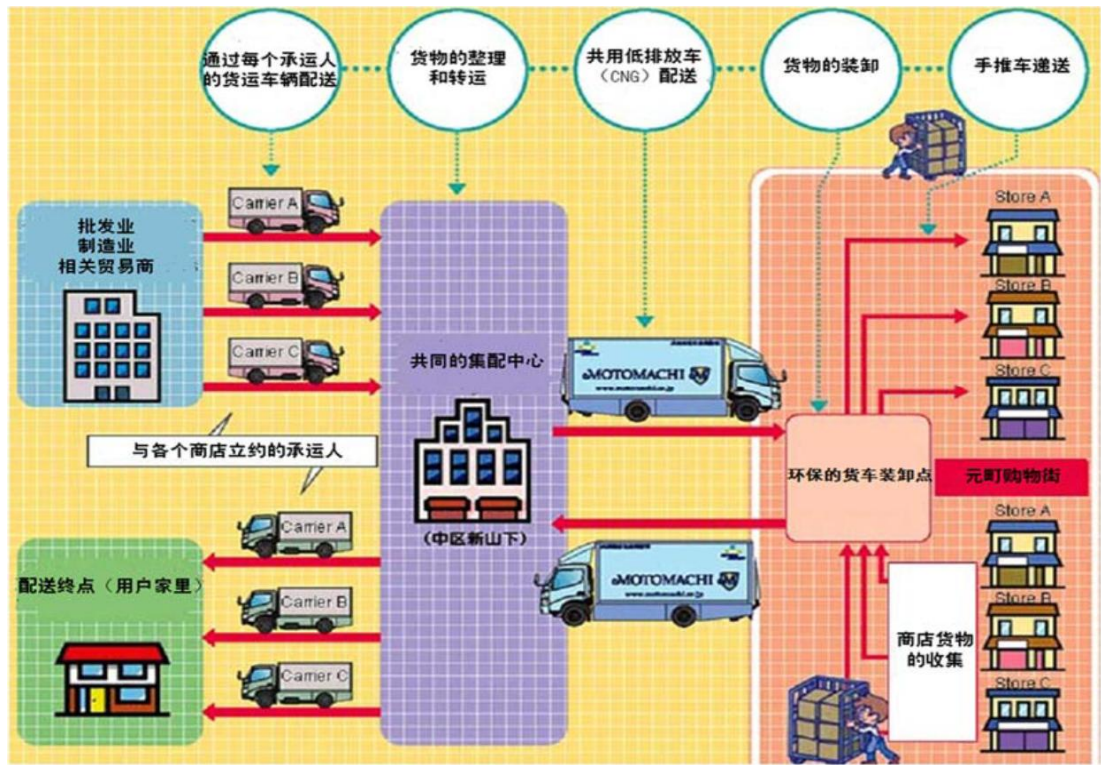


图 1 日本横滨元町购物街配送示意图

哥本哈根也实施了一项名为“City Logistic”^[7]的城市内物流项目，一方面通过在城市边缘引入物流中心，将物流活动从市中心迁移到更接近主要运输通道的地方，减少了货物在城市内的运输距离；另一方面重新设计城市内货物分拣和配送流程，引入了更为高效的配送方式，包括电动货车和自行车等。电动货车用于较大量货物的长途运输，而自行车则用于城市内最后一公里的配送。该项目鼓励了城市内的企业共享物流资源，通过合并货物运输需求，减少

了空驶和重复运输，提高了货物运输的利用率，降低了城市内货物配送的碳排放。

1.2 方式转换提升水铁比例

荷兰鹿特丹港、德国汉堡港、英国伦敦港、美国洛杉矶港等国际港口均把铁路作为集装箱港口必备的集疏运配套设施，与疏港高速公路视为同等地位。铁路在港口集疏运中承担重要的功能和地位，在集装箱吞吐量中承担了 8%-40% 的比例。通过推进交通运输方式的互联，特别是铁路和水路运输的互联，可以降低对道路货运的依赖。加强港口与铁路的无缝衔接、加强铁路集疏运通道规划建设、加强异地铁路场站设施布局、加强海铁联运政策扶持补贴有利于海铁联运的快速发展。

以汉堡为例，其作为德国的一个重要港口城市，投资发展现代化的铁路基础设施，以实现将货物从港口通过铁路网络连接到内陆地区。汉堡港铁路网络覆盖 300 公里，每天能够高效运营约 200 班次货运列车和 5500 多班次火车，全国 12% 的铁路货运都以汉堡港作为出发地或目的地。为确保铁路运输的顺利进行，所有集装箱码头均配备尖端、高性能的装卸设施；多功能码头与散货码头也与铁路网相连。汉堡港共承运 160 多家铁路公司的列车，这些公司依靠短途列车和直达列车在全欧洲打造了一个紧密交织的货运列车服务网络。铁路在速度、紧凑的散货运输能力、价格、可靠性和环境友好性等多个方面领先于公路货运，仅一列货运列车就可承担约 50 辆卡车的货运量，由公路向铁路的转变可使得货运碳排放大大减少^[8]。

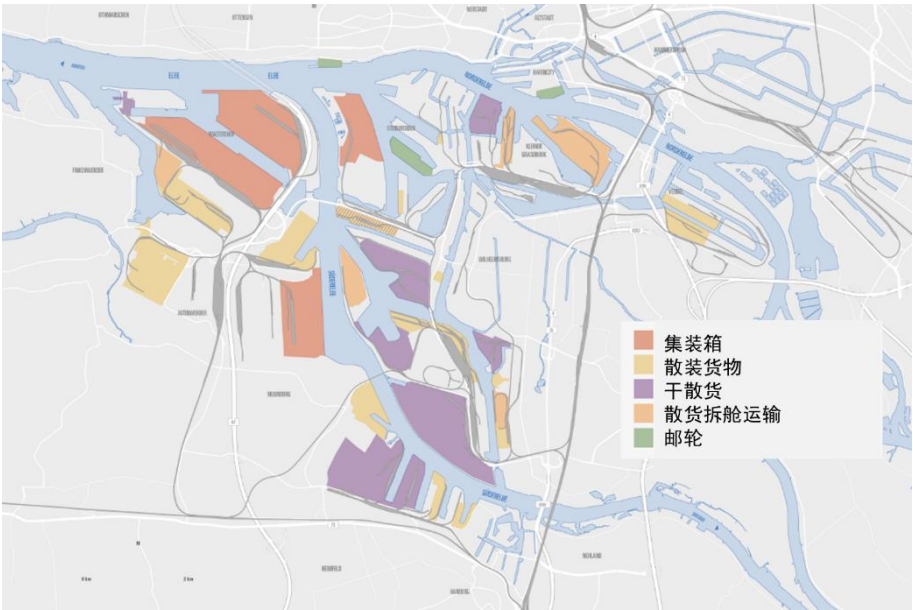


图 2 通往汉堡港各码头的铁路通道

1.3 推广新能源改善货车清洁度

(1) 美国加州：电动货车计划^[9]。加州一直是美国推动电动交通和清洁能源的先驱之一。交通运输是加州最大的温室气体排放和其他污染物的单一来源，约 25% 的温室气体排放都来自于此，电动货车计划是加州政府推动减少温室气体排放和交通污染的一部分。2020

年9月，加州州长签署了到2035年零排放行政命令(N-79-20)，届时在加州销售的所有新车必须零排放（包括轿车与皮卡）；到2045年，加州销售的重型车辆新车也必须零排放。2023年3月，拜登政府批准加州政府执行一项新规，要求2035年前，州内出售卡车以及重型车辆，电动车比例需不少于一半，以此遏制公路污染。

(2) HyTrucks: 欧洲最大的氢能项目之一^[10]。清洁氢是适合重型车辆的能源载体之一，可以减少温室气体、城市污染和对化石燃料的依赖。HyTrucks是欧洲最大的氢能项目之一，旨在将零排放重卡车队部署到欧洲交通繁忙地区。HyTrucks计划的使命是让欧洲270万辆重型卡车开始向零排放运输转型，这将每年减少3.24亿吨二氧化碳、14.3万吨氮氧化物和4000吨细粉尘，并创造超过15万个就业岗位。HyTrucks汇集了欧洲领先的托运商、承运商、卡车制造商、加油站运营商和氢气供应商。到2025年，该项目希望将1000辆重型氢卡车上路，并在欧洲最大的两个海港鹿特丹港和安特卫普港，欧洲最大的内河航运港口杜伊斯堡港以及其间的走廊上建立25个重型卡车加氢站，以推广氢能在货运行业的应用。

1.4 提升治理能力降低货运排放

(1) 美国纽约：货车通道(Truck Route)^[11]。货运车辆在城市内通行时，由于重量和体积大、转弯半径大、盲区多、行驶速度低、刹车距离长等因素，影响小汽车运行与道路整体通行效率，存在安全隐患，亟需加强有效治理。纽约市政府在深入调研的基础上，为大货车制定了专用线路—Truck Route，可直译为“货车通道”。通过合理规划货运路线，实现一定程度的客货分离，既减少客货混行带来的延误和安全隐患，又可通过货运通道地图指导货车在适合的路段运行，提升货运效率，降低碳排放。

(2) 英国伦敦：低排放区(LEZ)^[12]。为解决长期以来伦敦PM10浓度超标问题，2008年，伦敦市政府将大伦敦区总计1580km²的区域划为低排放区(Low Emission Zone, LEZ)，限制污染最严重的重型柴油车在该地区通行。低排放区政策实施后一年内，区域内PM10排放量比实施前下降了6.5%。在PM10治理取得成效后，伦敦依然面临中心区道路周边NO_x污染浓度超标问题。为降低NO_x排放、协同降低PM2.5和CO₂排放，2019年4月，伦敦交通局在21km²的核心区域进一步设置了超低排放区(Ultra Low Emission Zone, ULEZ)，限制车型种类相较于低排放区进一步增加，而后分别经过2021年10月和2023年8月两次区域扩大后，ULEZ已与LEZ范围相一致，均覆盖了整个首都地区。

伦敦市政府一方面通过对进入整个首都地区的尾气排放超过标准的机动车额外征收费用，另一方面开展了1.6亿英镑的报废计划，以援助符合条件的伦敦居民报废不符合超低排放区(ULEZ)排放标准的车辆，以此推动清洁能源车辆的应用。根据2020年10月发布的《伦敦环境战略：空气质量影响评价》研究可知，实施超低排放区后，核心区污染物排放大幅降低，NO₂排放量降低35%，约230吨；CO₂减排量12300吨，相当于在伦敦设置超800个太阳能光伏装置的碳减排量。

2 上海重型货车碳排放特征分析

本研究使用 2021 年 10 月 21 日上海市约 11 万辆 12 吨以上货车 GPS 数据,经数据筛选、空间匹配、数据清洗后,根据每辆车在连续两个时间戳间的行驶距离、平均车速及对应的碳排放因子,计算每辆车在各个轨迹段的碳排放,进而汇总获得每辆车的日碳排放量和全市货车碳排放总量,其具体实现过程可参考笔者之前的研究^[13]。将上海重型货车碳排放与路网进行匹配,进而分析重型货车碳排放在市域路网上的空间分布特征,如图 3 所示。受市区货运限行政策影响,重型货车碳排放主要分布在中心城区以外区域的道路网络。绕城高速、沈海高速、外环线作为骨干货运通道,是重型货车碳排放的主要空间。

上海工业产业基地主要分布在城市中外围区域,将上海重型货车碳排放空间分布与工业产业基地分布进行叠加(图 3),可以看出,临港装备业基地、松江工业区、嘉定汽车产业基地、宝山钢铁基地等制造业产业基地周边道路碳排放强度较高,说明汽车、钢铁等制造业产业基地存在较大的重型货车运输需求。后续将结合碳排放空间分布特征及其与产业基地相关关系制定针对性的规划对策和建议。



图 3 上海工业产业基地与道路碳排放叠加图

3 上海重型货车减碳规划对策与建议

3.1 优化市域产业空间布局，适度提升货运集中度

3.1.1 持续优化全市产业基地空间布局

2022 年底，上海全市工业、产业用地约 600 平方公里，总体而言，产业空间呈现出产业园区规模集聚度不高、土地集约利用水平低的情况。以新市镇产业区块为例，呈现规模小、布局散的特征，平均每个产业区块面积约 2-3 平方公里，全市共约 100 处。现状产业用地总量为 300 平方公里，规划产业用地约 200 平方公里。当前，上海既面临新项目对增量空间紧迫性需求，又面对大量存量低效产业用地闲置和盘活的压力。结合货运碳排放分析，研究认为推进产业用地适度集中化、集约化发展是重要的发展方向。这样既有利于促进产业发展，也有利于提升产业用地绩效，还可为促进货运需求规模化、方便低碳货运方式布局提供基础支撑条件。

一方面可优化产业结构，推进高污染、高能耗、低效益的工业用地转型与退出，合理优化用地规模，低碳利用工业用地资源；另一方面集聚产业用地，持续优化调整建设用地结构，统筹空间利用强度和品质，坚持“以强度换空间，以空间促品质”。考虑将单位产值碳排放量等碳排放指标纳入产业用地综合绩效评估体系，加强产业用地综合绩效评估和分类处置，持续推进土地高质量利用发展。

3.1.2 加强长三角产业跨区域协同发展

产业发展存在典型的区域特征，考虑到区域产业分工和竞争特征，应该加强从城市群、都市圈等区域发展视角，以及产业链上下游协作视角，统筹考虑产业空间布局，减少由于空间布局不合理造成的不必要货物运输需求。为进一步落实长三角一体化高质量发展要求，结合大都市圈空间规划和产业协同发展规划，亟需强化上海和都市圈、长三角城市群之间产业的整体协同、空间一体，加强上海的龙头带动作用 and 北部长江口、南部杭州湾、西部环太湖、东部深远海产业空间发展之间的战略纵深和链接贯通。

区域产业协同将落实在产业链、创新链的要素流动和空间配置上。在交通、信息、市场、产业等领域协调对接，建立长三角货物运输共同市场，完善一体化工作推进机制。优化城际货物运输路线和节点，建设高效的货运配送网络，减少运输过程中的能源消耗和碳排放，不断提升长三角运输整体效率和可持续性。

3.2 合理优化交通设施布局，加强低碳交通方式配置

3.2.1 形成大型港口与铁路运输通道的“零换乘”衔接

从重型货车碳排放空间分布来看，港口集疏运通道以及周边道路是重型货车碳排放的主要区域。现状上海港各港区铁路均未直接接入，铁路在集疏运系统中占比偏低，不足 0.1%。因此，对于重要港区，应加强铁路支线、专用线接入港区核心区域，进一步增强水铁联运比重，降低港口集疏运碳排放。从上海铁路系统发展来看，上海将形成五个方向、十二条干线

的铁路系统布局,规划外高桥、闵行、芦潮港、徐行、石湖荡等铁路物流基地,应进一步优化完善海铁联运设施,解决铁路进港区“最后一公里”问题。

3.2.2 推进货运需求较大的产业基地与水运系统直接衔接

从重型货车碳排放和产业空间布局关系来看,重要的工业产业基地周边道路也是重型货车碳排放的主要区域。现状除长兴、宝钢、临港等一部分产业基地外,多数产业基地仍未接入水运系统。后续在产业基地布局和选址中应加强与铁路和水运系统高效互动。货运量达到一定规模的产业基地选址应考虑铁路和水运系统衔接条件,并考虑铁路支线、专用线或水运码头等配套条件。

结合上海市产业基地与内河港区布局规划(图4)来看,上海化工经济技术开发区可接入漕泾港区;嘉定汽车产业基地可与安亭港区相衔接;而临港装备基地则可充分利用芦潮港一级港区条件,以此鼓励大宗货物从公路运输转向内河水运,进而减少运输过程碳排放。



图4 上海市产业基地与内河港区布局规划

3.3 碳视角下的路权再分配，交通空间向货运倾斜

3.3.1 研究建设全天候或限时货运专用通道, 提高道路货物运输效率

(1) 市域通道

根据《道路设施运行情况年度评估（2020年）》，G1503绕城高速是市域主要的环状运输通道。从碳排情况来看，结合既有研究中的重型货车碳排放特征分析^[13]，重型货车车速在

20-30 公里/小时拥堵状况下的碳排放是车速 60-80 公里/小时畅通状况下碳排放的 1.4 倍左右。从目前重型货车 GPS 反映的运输情况来看，在 G1503 上行驶的重型货车，在扣除 20 公里/小时以下的异常数据、极端拥堵数据后，瞬时速度分布呈现以下分布情况，仍有大量车辆的瞬时车速集中 20-40 公里/小时低速运行区间（图 5）。

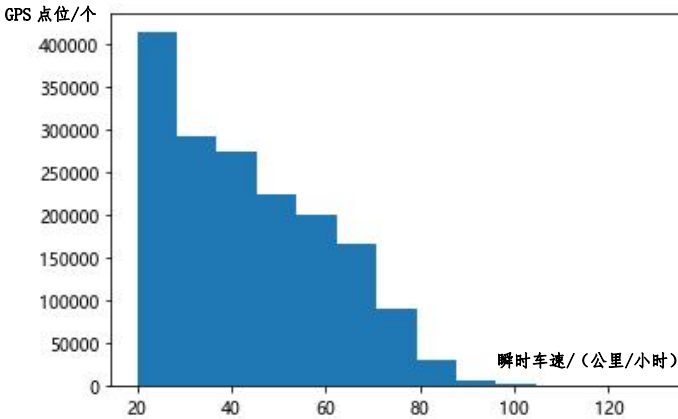


图 5 上海 G1503 绕城高速重型货车车速分布直方图

从车流构成来看，G1503 绕城高速全线日均客流量约 7 万 PCU，货运比例高达 50%左右，远超 G2 京沪高速 12%、G60 沪昆高速 15%、G15 沈海高速 27%的水平，是除外环外最为重要的货运通道。从道路运行状况来看，目前高速公路拥堵最为严重的区域集中在 G2、G60 及 G15 等放射线，G1503 相对而言总体拥堵状况良好，具备进一步调整路权划分的基本条件。

综上，结合现状 G1503 在本市客货运输中的作用和现状车流量数据，建议对类似 G1503 这样的公路货运主通道，研究运营组织适当优化的可行性。重点研究局部时段、局部车道货车专用模式，进一步降低客货干扰，提升货车运行效率，合理减少货车碳排放。

（2）新城通道

新城内部应立足于综合路网规划，研究布局 1 个货运通道环线，合理选用实体专用道路形式或局部时段专用、部分车道专用等形式，串联现状各类产业园区，同时在环线内部控制货车通行。以松江新城为例，可由松卫北路-辰花路-辰塔路-金玉路构成新城内部货运通道环，串联新城周边各类产业区，解决货运穿城的问题。

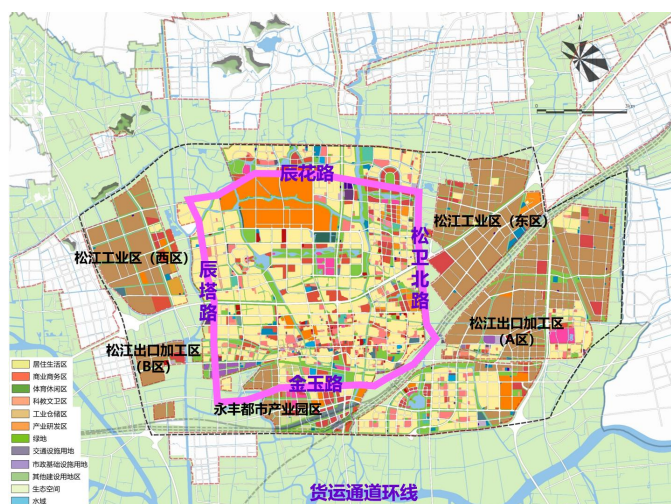


图 6 松江新城货运环线布局示意图

3.3.2 构建绕城高速附近市域铁路货运通道，采用客货兼用模式

从货运需求角度看，根据五个新城和上海产业园区布局规划，新城工业区和本市主要的产业基地都分布在 G1503 绕城高速沿线（图 7）。从交通基础设施角度，一方面，市域铁路网络具有富余运输能力，上海在五个新城圈层规划了宝嘉线、嘉青松金线、南枫线等多条市域铁路线路，运能在 100 万量级，具有较为富裕的运输能力；另一方面，市域铁路网络具备较好的运输组织条件，通过客货混编、货运专列等运输模式实现货物运输功能。

综上，结合本市五个新城规划、产业园区布局规划及市域铁路网络规划，研究建议对 G1503 沿线、串联五个新城和主要产业基地的南枫线、嘉青松金线、宝嘉线等市域铁路线路，研究赋予其运输一定类型货物的要求，提供将部分货物运输由公路转向铁路的设施条件。



图 7 上海产业园区规划分布与 G1503 及相关市域铁路线路空间关系

3.4 合理引入清洁燃料货车，“定长运输”中率先示范

2024 年 2 月 20 日，交通运输部发布了《关于国家电力投资集团有限公司开展重卡换电站建设组网与运营示范等交通强国建设试点工作的意见》。《意见》提出了重卡换电站建设组网与运营示范、氢燃料电池研发与氢能交通运营平台应用、城市级绿能交通体系建设与应用三方面内容。国家战略层面的重视以及新能源技术的发展为清洁燃料货车推广提供了契机。

3.4.1 定长运输线路中率先开展电动货车试点

相对于液化天然气等其他能源类型的重型货车来说，重型卡车电动化没有明显优势，只适合在相对距离较短的封闭区域内推广，可在部分“定长运输”线路中开展率先示范。图 8 为起讫点在闵行经济技术开发区内的货车 OD 分布，可以看出该产业区运输具有一定的方向性且起讫点较为均衡，其与西北侧松江新城以及东北侧吴泾的运输比例较大，分别占该产业区货车流量的 18%（近 10000 辆）和 12%（约 6500 辆）。这两个主要 OD 出行距离分别为 14 公里和 11 公里，距离相对较短，适宜作为电动货车试点，可在 OD 两端布设充电桩以便电动货车的推广使用。

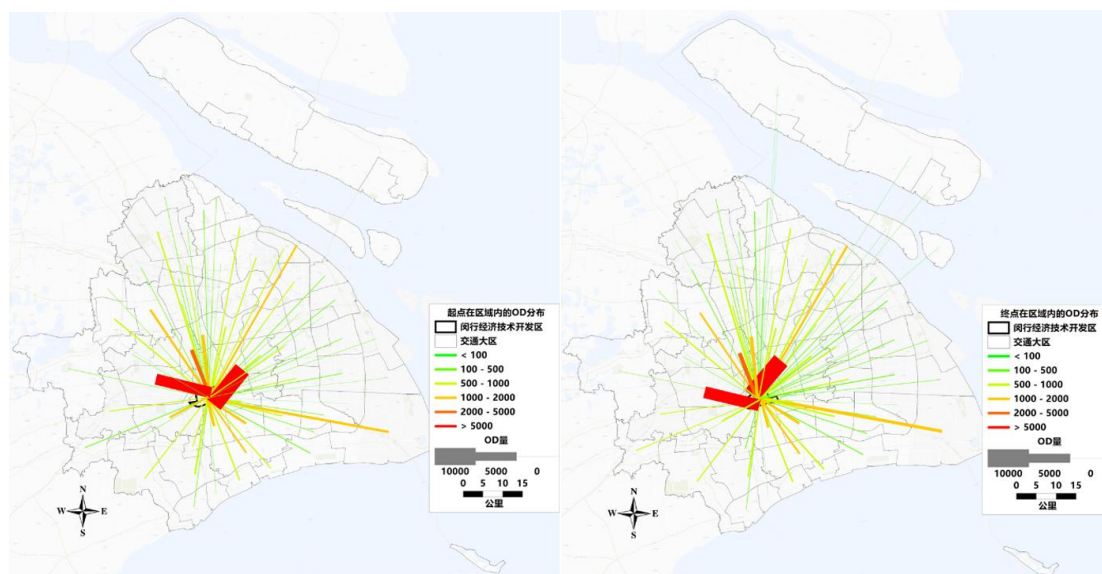


图 8 起讫点在闵行经济技术开发区内的货车 OD 分布

3.4.2 充电站+换电站协同配置打造配电网络

结合上海产业基地与道路碳排放分布情况（图 3），可以看出产业基地周边道路碳排放强度较高，存在较大的重型货车运输需求。可在各产业基地配置 1-2 个充电站，布设位置可选在靠近主要货运路线或者工业园区的入口处，以满足电动货车的充电需求。同时建议沿产业集聚的绕城高速公路布局一系列的重型货车换电站，以便货车司机在运输中及时进行电池更换，从而确保其持续的行驶能力，降低因为电量不足而导致的运输延误和成本增加。充电站和换电站的协同配置有利于打造高效便捷的重卡配电网络，为电动货车提供了可持续的服

务支持,有助于推动电动货车在城市货运中的广泛应用,进一步减少碳排放和改善空气质量。

4 结语

本文结合国际城市实践经验与上海重型货车碳排放特征分析,从空间、交通和碳排放协同角度提出了上海重型货车减碳策略与建议,具体包含优化产业空间布局、优化货运交通结构、优化交通路权分配、优化能源利用结构等方面,研究成果可为上海科学减碳规划提供决策支撑,并进一步提高上海货运减碳效率。后续可针对本文提出的减碳策略制定明确的规划方案,以推动政策落地实施,进而加快上海货运减碳进程。

参考文献

- [1] International Energy Agency. World energy outlook 2022[M]. International Energy Agency, Paris, 2022.
- [2] 李晓易, 谭晓雨, 吴睿等. 交通运输领域碳达峰、碳中和路径研究[J]. 中国工程科学, 2021, 23(06):15-21.
- [3] 张明琦, 郑泽东, 李永东. 公路货运能耗及低碳化发展路径研究[J]. 机车电传动, 2022, (03):10-16.
- [4] Lopez N S, Soliman J, Biona J B M, et al. Cost-benefit analysis of alternative vehicles in the Philippines using immediate and distant future scenarios[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2020, 82: 102308.
- [5] 邱诗永. 基于“避免—转移—提升”的绿色出行经验与启示[J]. 世界环境, 2019(04):33-36.
- [6] 物流评论. 物流近期趋势-劳动力短缺、物流共享、技术趋势等. [EB/OL]. [2023/12/25]. <https://www.sakata.co.jp/logistics-366/>
- [7] City Logistic. City Logistic reduces congestion and emissions by rethinking city logistics with a customer-centric focus and electrified deliveries. [EB/OL]. [2023/12/20]. <https://www.citylogistic.dk/>
- [8] Port of Hamburg. Europe's largest rail port. [EB/OL]. [2023/12/25].
- [9] <https://www.hafen-hamburg.de/cn/transport/rail/>
- [9] 美国中文网. 2035 年一半以上卡车需电动 加州新规扫清障碍. [EB/OL]. [2023/11/28]. <https://www.sinovision.net/society/202303/00528841.htm>
- [10] Port of Antwerp Bruges. HyTrucks consortium aims to have 300 hydrogen-powered trucks on the road in Belgium by 2025. [EB/OL]. [2023/12/18]. <https://newsroom.portofantwerpbruges.com/hytrucks-consortium-aims-to-have-300-hydrogen-powered-trucks-on-the-road-in-belgium-by-2025>

[11] New York City. Trucks & Commercial Vehicles. [EB/OL]. [2024/12/20].

<https://www.nyc.gov/html/dot/html/motorist/trucks.shtml>

[12] Transport for London. Ultra Low Emission Zone. [EB/OL]. [2024/1/12].

<https://tfl.gov.uk/modes/driving/ultra-low-emission-zone>

[13] 金昱, 刘皓冰. 基于 GPS 数据的重型货车碳排放计算及时空分布研究[J]. 交通运输研究, 2022, 8 (06) :90-97.

作者简介

田田甜, 女, 博士, 上海市城市规划设计研究院, 助理规划师。电子邮箱:
tiantt@supdri.com

金昱, 男, 博士研究生, 上海市城市规划设计研究院, 高级工程师。电子邮箱:
jinyu@supdri.com

宋少飞, 男, 博士, 上海市城市规划设计研究院, 助理工程师。电子邮箱:
ssf0307@126.com

基金项目:上海市科学技术委员会“科技创新行动计划”软科学研究项目“基于用地和交通协同的上海重型货车减碳策略研究”(23692112500)